

EFFECTOS DE LOS ÁRBOLES SOBRE EL VIENTO EN EL MEDIO URBANO¹

Lizeth Rodríguez Potes*

Resumen

Este trabajo aborda uno de los fenómenos del microclima: el flujo de viento en medio urbano y cómo los árboles lo influyen. Los casos de estudio o configuraciones, modelizados con el programa computacional GAMBIT, comprenden dos tipos de calle cañón, dos tipos de edificio, árboles de diferentes dimensiones, formas y LAD (*Leaf area Index*) y el entorno inmediato.

El flujo de viento en las diferentes configuraciones es simulado con el programa computacional FLUENT. La simulación de una situación con árboles y la otra sin árboles permite comparar y determinar el impacto de la zona vegetal sobre el flujo de viento. El análisis de las velocidades del viento sobre diferentes puntos de la calle cañón, indica sea una reducción o sea un aumento de la velocidad del viento. Ciertos efectos debido a la influencia del árbol son observados en las calles cañón orientadas paralelamente al viento dominante. En las calles orientadas perpendicularmente al viento dominante, los efectos están ligados directamente a la geometría del edificio. En fin, un análisis de las condiciones de confort debido al viento desde el punto de vista mecánico, revela zonas susceptibles de desarrollar anomalías aerodinámicas que pueden ser desagradables para el peatón, pero que pueden ser corregidas con medios simples de control del campo de velocidad.

Palabras clave: Viento, vegetación, calle cañón, microclima urbano, simulación digital, confort debido al viento.

* Arquitecta, Catedrática de la CUC y la Universidad del Atlántico. Maestría en Ciencias y Técnica de Medios Ambientes Urbanos de la Escuela Central de Nantes, Francia. Línea de investigación: medio ambiente, urbanismo bioclimático.

lrodrigu27@cuc.edu.co

Recepción: Marzo de 2010

Aceptación: Abril de 2010

Artículo de investigación

¹ Los efectos de los árboles sobre el viento en un medio urbano. *Effects of trees in wind flow in an urban site*. Título original en francés: *Les effets des arbres sur les écoulements de vents en milieu urbain*. Artículo de resultado de investigación para obtener el título de Maestría de la Escuela Central de Nantes, finalizada en septiembre de 2007 y presentado en el CERMA.

EFFECTS OF TREES IN WIND FLOW IN AN URBAN SITE

Lizeth Rodríguez Potes

Abstract

This Master's document is based in one of the variables in a microclimate: The wind flow in an urban site and how the trees influence it. The study cases or configurations, modeled with the computational program GAMBIT, include two street canyon types, two building types and the trees with different dimensions, shapes and LAD (Leaf area Index) and the near environment.

The wind flow in the different configurations are simulated with the computational program FLUENT. The numerical simulation of two situations, one without trees and the one other with trees, enables to compare the trees zone impact over the wind flow. The wind speed analysis in the different points of the street canyon, indicate that the tree induce either a wind speed increase, or a wind speed reduction. The effects due to the trees influence are observed in the street canyons oriented parallelly to the dominant wind flow. In the street canyons oriented perpendicularly to the dominant wind flow, the effects observed are due directly to the building's geometry. Finally, a discomfort conditions' approach due to the wind flow from the mechanic point of view reveal the susceptible zones to develop the streamlines anomalies that can be uncomfortable for the pedestrians, but that they can be corrected with the simple ways of control from the speed field.

Key words: Wind flow, trees, street canyon, urban microclimate, numerical simulation, comfort due to the wind flow.

INTRODUCCIÓN

La mineralización de las ciudades, al reemplazar la vegetación y las zonas húmedas por concreto y asfalto, contribuye a la aparición de daños al medio ambiente y al bienestar humano. Las grandes ciudades en verano, desarrollan cada vez más problemas microclimáticos tales como el estrés térmico, el smog, los picos de polución y de consumo energético por la climatización, ligados al fenómeno de Isla de Calor Urbana [Robitu, 2005]. Este fenómeno está caracterizado por numerosos procesos físicos tales como la acumulación de calor en las construcciones, la alteración del ciclo del agua, la alteración del microclima local, la producción de gas de efecto invernadero, la reducción de la velocidad del viento, entre otros [Oke, 1987. Mestayer *et al*, 1994]. En razón del calor excesivo, aparecen necesidades más fuertes de climatización de los espacios, lo que conduce a un aumento de la demanda energética de aires acondicionados. Por cada aumentación de la temperatura de 0,5°C, los picos de cargas de aires acondicionados se elevan de 1,5 a 2%. De esta forma, con el aumento de la temperatura de 1 a 2°C durante las cuatro últimas décadas, se estima que el 3 al 8% de la demanda energética servirá para compensar el efecto de Isla de Calor [Vinet, 2000]. Esos fuertes picos de consumo energético en verano, inducen a la vez a un aumento de emisiones de gas de efecto invernadero, acentuando el círculo vicioso del calentamiento global.

La arborización urbana puede atenuar los efectos de este fenómeno, como ya ha sido demostrado por diferentes investigaciones científicas que han probado la incidencia de la vegetación sobre diversos fenómenos tales como la humedad, el viento o la temperatura. La reducción del consumo energético así como la reducción en las emisiones de gas de efecto invernadero, ligados al fenómeno de isla de Calor Urbano, hacen del control de condiciones microclimáticas con los elementos naturales, un objetivo indispensable. Igualmente, en las discusiones sobre el calentamiento global, la contribución de los árboles y los bosques como captadores de carbono es frecuentemente mencionado. De hecho, los árboles por medio de la fotosíntesis, capturan el gas carbónico (CO₂) para integrarlo a su biomasa: tallos, ramas, hojas y raíces. Además, utilizando los árboles como medios naturales de acondicionamiento microclimático, numerosos beneficios aparecen: sombra tan necesaria en nuestro clima, canalización de los vientos y enfriamiento pasivo. En este contexto, la utilización de árboles para el enfriamiento pasivo se vuelve necesario y su introducción masiva

debe ser una prioridad.

La urbanización es una de las actividades que más ha contribuido a la pérdida y destrucción progresiva de la vegetación nativa es por ello que los arquitectos y urbanistas debemos actuar creando espacios que tomen en cuenta la vegetación y contribuir a la búsqueda de mejores condiciones de confort climático en una perspectiva de desarrollo sostenible.

METODOLOGÍA

Este trabajo se apoyó en investigaciones precedentes sobre la simulación de microclimas urbanos. Los casos de estudio obedecen a una selección previa y metodológica de escenarios urbanos conformados por elementos artificiales y naturales y variables ambientales y morfológicas.

La elección de los casos de estudio obedece a parámetros concernientes a una calle cañón y las especies de árboles más adecuadas para el clima del sitio propuesto.

Zona de estudio

Los casos de estudio se localizan en la ciudad de Barranquilla, Colombia, situada a 11°15' latitud Norte, 74° longitud oeste y 13 m de altitud. El clima de Barranquilla está clasificado como tropical caliente y húmedo. La temperatura promedio del aire es del orden de los 24 a los 33 °C, con ligeras variaciones durante el día y la noche. Los vientos predominantes son los alisios con velocidades de 1.5 y 7 m/s en donde el 34% viene del noreste, el 28% del norte y el 38% restante de otros puntos cardinales. La humedad varía de 77 a 84% durante todo el año.

Presentación del modelo de la vegetación

El modelo seleccionado para realizar las simulaciones es el modelo "Termo-aerodinámico de la vegetación" que ha sido programado con las ecuaciones de mecánica de fluidos: ecuación de la conservación de la energía, con un término de pérdida de carga, la ecuación de Kobayashi y la ecuación del modelo de turbulencia K- ϵ , resueltas con el programa computacional FLUENT (*Computational Fluid Dynamics*) [Robitu, 2005].

En este modelo las escalas utilizadas son:

- La escala local que corresponde a la calle y el edificio,
- La escala global que corresponde a los vientos dominantes.

Las hipótesis de partida para este modelo son:

Se toma en cuenta el follaje del árbol pero no el tronco.

Una comparación entre situaciones con vegetación y sin vegetación con el fin de determinar el impacto de la vegetación.

Se estudia el flujo del viento sin tomar en cuenta otro aporte térmico como la radiación solar y la transpiración de las hojas.

La modelización del entorno próximo (calles), sin modelizar el resto del medio urbano (ciudad).

Descripción de las configuraciones

Se denominan configuraciones la escena o el conjunto conformado por la calle cañón con los edificios y los árboles y el entorno (algunos edificios alrededor de las escenas que tiene una influencia sobre el viento). Para definir las configuraciones se estudiaron primeramente los parámetros de la calle y las especies de árboles.

Descripción de los tipos de calles modelizadas

Se seleccionó como dominio de estudio una calle cañón típica que es característica de numerosos centros urbanos [Bozonnet, 2005]. Para una calle cañón típica los parámetros geométricos pertinentes son: altura promedio de los edificios H , ancho de la calle W y largo de la calle L . Se seleccionaron como orientaciones de la calle cañón, las dos más frecuentemente utilizadas en los estudios científicos:

- La calle cañón paralela a la dirección del viento dominante [Nicholson, 1975].
- La calle cañón perpendicular a la dirección del viento dominante [Hotchkiss et Harlow, 1973].

Las dimensiones de las calles corresponden a una vía colectora tipo de Barranquilla, en la cual las dimensiones son de 14 a 22 ms. Estas dimensiones se variaron para tener dos tipos de calles: A y B.

Calle tipo A

Representativa de zonas de baja densidad de construcción en donde los edificios

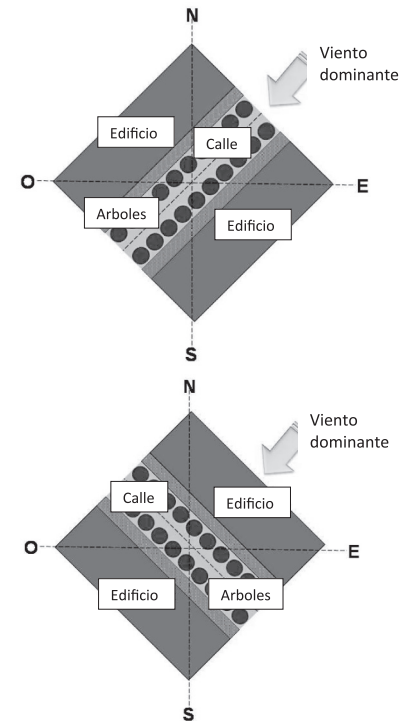


Figura 1. Orientación de las calles cañón seleccionadas. a) Orientación noreste/suroeste donde el eje de la calle es paralelo al viento dominante. b) Orientación noroeste/sureste donde el eje de la calle es perpendicular al viento dominante.

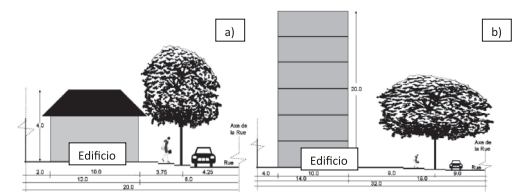


Figura 2. a) Corte transversal de la calle tipo A. b) Corte transversal de la calle tipo B.

son de poca altura y los andenes y la separación árbol-edificio es más estrecha.

Calle tipo B

Representativa de zonas de alta densidad de construcción en donde los edificios son altos y los andenes y la separación árbol-edificio es más grande.

Especies de árboles seleccionadas

La selección de las especies arbóreas simuladas en este trabajo parte de una clasificación previa de las especies vegetales del bosque seco tropical de la costa norte de Colombia². Los parámetros de selección fueron los siguientes:

1. Confort: árboles con los mejores índices de confort según GEAB³ [GEAB, 2004].
2. La permanencia del follaje: árboles perennes. Las formas de copa seleccionadas son: globo, irregular y paraguas.
3. Densidad del follaje⁴: se tomó como valor promedio un LAD=1 m²/m³ [Robitu, 2005].
4. Plantación en la ciudad: las dimensiones, altura, diámetro de la corona y altura del tronco son adecuadas para ser plantadas en las calles. Para la calle tipo A los parámetros son los siguientes: separación árbol-edificio: 3.75 ms y diámetro de la corona de los árboles: ≤6m. Para la calle tipo B: separación árbol-edificio: 9 ms y diámetro de la corona de los árboles: ≤9.0 ms.

Las especies que cumplen con todos los parámetros anteriores son las siguientes: *Capparis Indica*, *Cordia Sebestena*, *Guaiacum officinale*, *Thespesia*, *Populnea*, *Blighia Sapida* *Ficus Benjamina*, *Ficus Retusa* *Manguifera Indica* y *Manilkara Zapota*.

Después de haber definido todos los parámetros para crear los escenarios de estudio se combinaron entre sí para crear varias configuraciones que fueron el objeto de las simulaciones. La tabla 1 sintetiza las configuraciones con sus características.

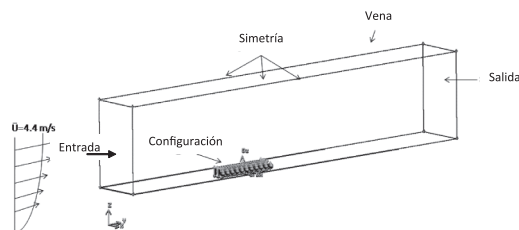


Figura 3. Condiciones límites para las configuraciones en la vena de FLUENT.

- 2 GEAB [GEAB, 2005] identificó 66 especies vegetales con características propias de la vegetación arbórea, es decir con un tronco leñoso que emerge del suelo y se ramifica.
- 3 Para el cálculo del índice de confort de la vegetación arbórea en el clima cálido se tomaron medidas de la temperatura y humedad relativa bajo y fuera de la copa del árbol simultáneamente y a una altura de 1.5 ms del suelo.
- 4 En el modelo de vegetación utilizado, la estructura del árbol fue simplificada haciendo la suposición que la densidad del follaje es uniforme en toda la copa del árbol. Sin embargo, en la realidad, la densidad del follaje varía según la especie seleccionada de modo que en algunas especies la mayor parte del follaje se encuentra en la parte superior del árbol y en otras se encuentra en la parte inferior de este [Rauner, 1976; Hicks *et al.*, 1975].

Configuración	Tipo de calle	Tipo de árbol	Orientación de la calle
N° 1	A	Pequeño-globo	Paralela al viento
N° 2	A	Pequeño-irregular	Paralela al viento
N° 3	A	Sin árbol	Paralela al viento
N° 4	B	Mediano-parasol	Paralela al viento
N° 5	B	Mediano-irregular	Paralela al viento
N° 6	B	Sin árbol	Paralela al viento
N° 7	A	Pequeño-globo	Perpendicular al viento
N° 8	A	Pequeño-irregular	Perpendicular al viento
N° 9	A	Sin árbol	Perpendicular al viento
N° 10	B	Mediano-parasol	Perpendicular al viento
N° 11	B	Mediano-irregular	Perpendicular al viento
N° 12	B	Sin árbol	Perpendicular al viento

Tabla 1. Síntesis de las configuraciones simuladas

Simulación de las configuraciones

En el programa FLUENT, se situaron las configuraciones en una vena como se realiza en los estudios de túnel de viento y cuyas dimensiones dependen del tipo de configuración.

EL perfil teórico de viento para la entrada en el túnel de viento en FLUENT fue definido en una función que contiene: la velocidad del viento de referencia $\bar{U}(10m)=4.0$ m/s, el coeficiente de rugosidad $\alpha=0.26$, el valor de la energía cinética turbulenta $\kappa=0.42$ y el coeficiente de arrastre $c_d=0.2$.

RESULTADOS

Criterios de análisis

Los criterios que se tuvieron en cuenta para el análisis de los resultados de las simulaciones son: naturaleza de los efectos (efecto de esquina, de canalización, sombra aerodinámica), influencia de la geometría de los edificios, influencia de la orientación de la calle con relación a la dirección del viento, influencia de la forma y la dimensión del árbol y el perfil de la velocidad del viento.

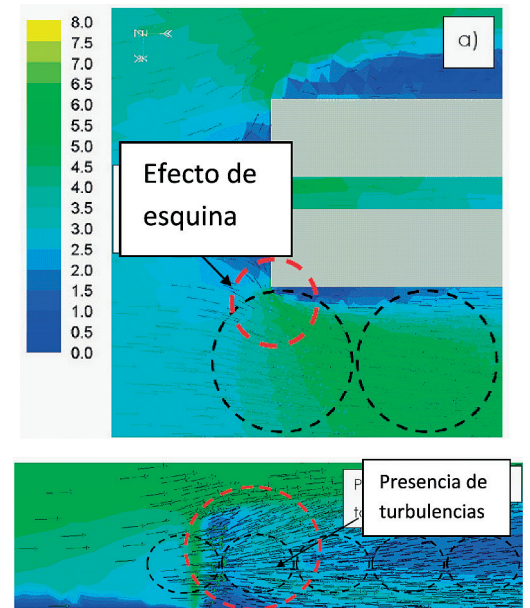


Figura 4. a) Detalle en planta de la zona 1 de la configuración 5. b) a) Sección de la zona 1 de la configuración 5.

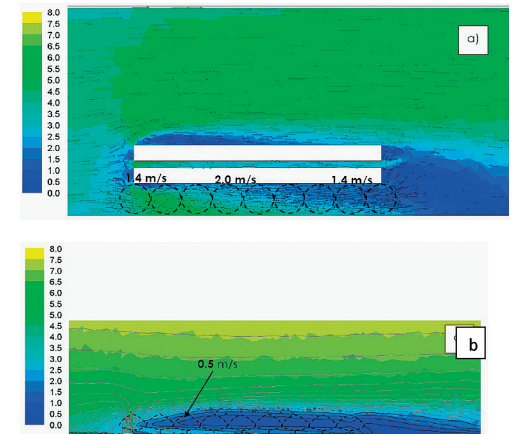


Figura 5. Dirección y velocidad del viento en la configuración 4. a) Planta b) Corte longitudinal mostrando los árboles en forma de paraguas.

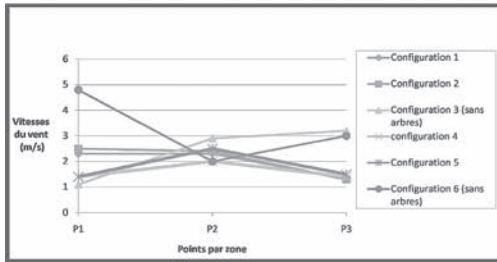


Gráfico 1. Perfiles de velocidad del viento en las configuraciones del caso 1.

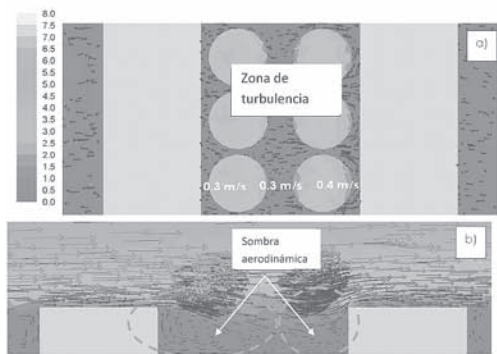


Figura 6. a) Detalle en planta de la sombra aerodinámica en la configuración 7. b) Corte de la sombra aerodinámica.

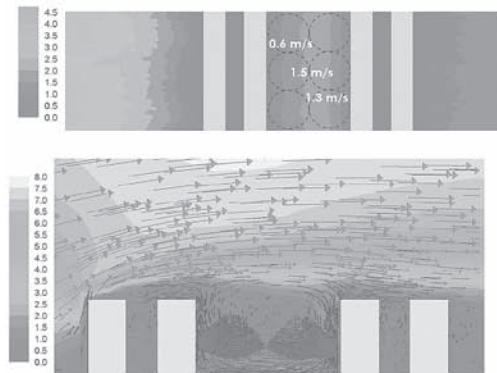


Figura 7. Plano y corte transversal de la configuración 10.

Análisis de las configuraciones del caso 1

En los dos primeros grupos correspondientes al caso 1 (configuraciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6) se analiza la zona situada entre el edificio y el árbol, que corresponde al recorrido del peatón. Los perfiles de velocidad se definen con mediciones efectuadas a una altura de 1.5 ms del suelo en puntos (P1, P2 y P3) situados respectivamente en: la entrada de la calle o zona 1 (P1), en el centro de la calle o zona 2 (P2) y la salida de la calle o zona 3 (P3).

Los efectos observados son los siguientes:

En el P1 se observa un efecto de esquina, de Venturi y torbellinos, provocando una aceleración del flujo de viento.

En el punto 2 se produce un efecto de canalización del viento a todo lo largo de la calle, con una dirección y velocidad constante según el tipo de configuración.

La zona 3 presenta un efecto de sombra aerodinámica en la zona aval de las edificaciones provocando movimientos turbulentos del viento.

La comparación entre el perfil de velocidad de los grupos 1 y 2 muestra una grande variación de velocidades. Esto se puede explicar por la geometría del edificio y la posición de las mediciones. En la calle tipo A, el corte de las mediciones pasa más cerca de las paredes del edificio porque la calle es más estrecha, en consecuencia las velocidades medidas se encuentran más al interior de la zona turbulenta donde las velocidades del viento son inferiores. En la calle tipo B, por el contrario, los puntos de las mediciones de velocidad pasan al lado de la zona turbulenta, en la entrada, donde se encuentra un aumento de la velocidad provocado por el efecto de esquina y la inexistencia de árboles como obstáculo al viento. En la zona central de la configuración 6, el punto de medición se encuentra aún en una zona turbulenta a bajas velocidades. Hacia el final de la calle, la velocidad se incrementa pues el efecto de turbulencia ha disminuido.

Análisis de las configuraciones del caso 2

Los grupos 3 y 4 corresponden al caso 2 y a las configuraciones 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Fueron analizados los puntos de medición de velocidad P1, P2 y P3, situados en el

corte transversal de la calle a una altura de 1.5 ms. Los puntos corresponden a la zona peatonal y un punto medio situado en la acera que permite comparar las velocidades de esta zona turbulenta.

Este caso se caracteriza por una sombra aerodinámica a lo largo de la calle y que varía según la geometría de esta y la presencia del árbol como obstáculo al viento. Esta perturbación del viento crea movimientos turbulentos a intensidades relativamente reducidas.

Las configuraciones 7 y 8 presentan cada una dos sombra aerodinámicas que no interactúan la una con la otra. La configuración 9 presenta una interferencia de sombras aerodinámicas. Las configuraciones 10, 11 y 12 se caracterizan por la existencia de un solo torbellino provocado por la geometría de la calle.

La comparación entre el perfil de velocidad de los grupos 3 y 4 muestran variaciones muy importantes entre un grupo y otro. En el grupo 3, las velocidades son reducidas y solamente el caso sin árboles muestra un aumento de la velocidad del viento en el punto 2. En el grupo 4, las velocidades en general son más fuertes que las del grupo 3. Además, la curva tiene una tendencia a aumentar entre el punto 1 y el punto 2, donde las velocidades son todavía más fuertes y descienden de nuevo en el punto 3.

Aproximación a la percepción de confort en las zonas de las configuraciones

El viento puede ser una causa de las molestias experimentadas por los peatones en los espacios exteriores debido a su frecuencia y su fuerza, a veces acrecentada por las edificaciones cercanas [Gandemer *et* Guyot, 1976]. Estas molestias son definidas como incomfort debido al viento.

La aproximación a las condiciones de confort posiblemente experimentadas por los peatones en las configuraciones estudiadas, intenta mostrar cómo serían los ambientes en esas calles, qué actividades podrían efectuarse y cuál podría ser la percepción de confort del peatón gracias a los valores de velocidad, a los porcentajes de frecuencia de velocidad del viento y a la utilización de la escala Beaufort.

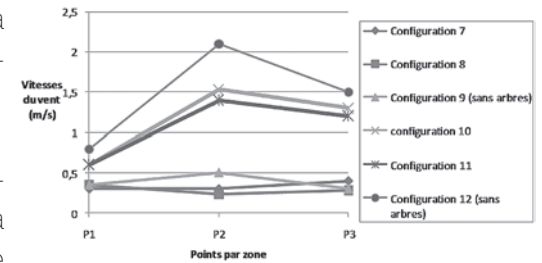


Figura 8. Perfiles de velocidad del viento en las configuraciones del caso 2.

Esta aproximación es una manera de abordar y de integrar el fenómeno viento en los procesos de diseño urbano.

Para este análisis se retuvieron las configuraciones del caso 1 (1, 2, 3, 4, 5 y 6) donde se produjeron efectos muy importantes debido a la interacción viento-árboles. El caso 2 no fue considerado puesto que los efectos en el viento están directamente ligados a los edificios. Se tomaron datos provenientes de la escala Beaufort que define las sensaciones provocadas por la velocidad del viento en función de su velocidad a una altura de 2 ms [Gandemer *et* Guyot, 1981]. Según esta escala, los primeros efectos aparecen a una velocidad de 1.5 m/s. Se tomó como condición de confort a respetar una velocidad de $\sigma \leq 6$ m/s. Esta velocidad se asoció a una frecuencia de incomfort, es decir, el porcentaje de tiempo anual durante el cual la condición de confort a respetar es sobrepasada. La frecuencia de incomfort depende de las actividades a realizar en los espacios, por ejemplo, si se trata de una zona donde no hay circulación peatonal se puede aceptar un rebasamiento del 50% pero para zonas peatonales o terrazas el límite es 5% [Gandemer *et* Guyot, 1981]. La rosa de los vientos de la estación de Soledad, Atlántico del servicio meteorológico IDEAM, indica que para una velocidad de 4.0 m/s el porcentaje es 10%.

Para cada punto se examinó:

- Relación velocidad/turbulencia y su impacto en la ventilación y el confort con la escala Beaufort.
- Frecuencia de incomfort.
- Estrategias arquitectónicas para el mejoramiento de las condiciones de confort.

De esta aproximación se concluyó que en general, los puntos P1 y P3 pueden ser incomfortables, ya sea por falta de ventilación o por fuertes vientos molestos para el peatón. En los dos casos, estas molestias dependerán de las actividades de la zona. Si se tratara solo de una caminata simple, los efectos no se harían notar, pero si se tratase de actividades pasivas o un café al aire libre, ocurrirían perturbaciones importantes. Se constató que las esquinas de las calles del caso 1 son susceptibles a desarrollar anomalías aerodinámicas (efecto de esquina y torbellinos), algunas de estas podrían corregirse con medios simples de control del campo de velocidad [Gandemer *et* Guyot, 1976]. En función de las necesidades, se pueden aplicar dis-

tintas estrategias de diseño como densificar las inmediaciones de las esquinas de los edificios con árboles pequeños o arbustos para reducir la velocidad del viento. Se pueden alternar diferentes copas de árboles para permitir la entrada y canalización del viento en las zonas donde se requiera. Si el efecto de canalización tiende a ser inconfortable, se pueden aplicar estrategias como la rugosidad del suelo o aumentar la porosidad con la separación de los inmuebles, la utilización de cortavientos, mobiliario urbano o vegetación. En todo caso estas estrategias deben ser estudiadas con más detalle.

CONCLUSIONES

El análisis de las configuraciones del caso 1 (configuraciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6) mostró efectos muy importantes debidos a la influencia del árbol: efecto de esquina, de Venturi y torbellinos provocando una aceleración del flujo de viento, un efecto de canalización a lo largo de la calle, a una dirección constante y a velocidades variables según el tipo de configuración (con o sin árboles) y efectos de sombra aerodinámica en la zona aval del edificio. El caso 2 (configuraciones 7, 8, 9, 10, 11 y 12) no muestra cambios debido a los árboles pero sí ligados a las edificaciones. Este caso se caracteriza por sombras aerodinámicas que no interactúan, sombras aerodinámicas que interfieren y torbellinos. En general el árbol induce a un aumento o una reducción de la velocidad del viento en función de su forma, talla y los obstáculos que lo rodean.

Pertinencia de resultados

Los resultados de las simulaciones realizadas en este trabajo son coherentes con otros modelos ya utilizados. Estos permiten abordar el fenómeno viento y su influencia y dan además una idea del comportamiento aerodinámico de una calle cañón simplificada. La metodología desarrollada en este trabajo permitió exponer criterios de selección de los elementos a estudiar y sus parámetros de análisis, la comparación de diferentes configuraciones y validar algunas teorías ya desarrolladas por otros autores.

El mejoramiento de este trabajo se proyecta hacia una aplicación a una escala más grande como la de un barrio o una ciudad y los resultados de las simulaciones pueden ser confrontados con mediciones tomadas en trabajo de campo. Esto último se justifica en el marco de la eficiencia energética de la arquitectura y el urbanismo en la perspectiva de la alta calidad ambiental de las ciudades.

BIBLIOGRAFÍA

- BOZONNET, Emmanuel. 2005. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon. Université de La Rochelle. 176 p.
- CLOUGH, B.F., J.E. Ong y G.W. Gong. 1997. Estimating leaf area index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata*. *Marine Ecology Progress Series* 159: 285–292.
- CODER, KD. 1996. Identified Benefits of Community Trees and Forests. University of Georgia Cooperative Extension Service - Forest Resources Publication FOR96-39.
- GANDEMER J. et GUYOT A. 1976. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme. Paris. 130 p.
- GANDEMER, Jacques et GUYOT, Alain. 1981. La protection contre le vent. *Aérodynamique des brises vent et conseils pratiques*. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris.
- GEAB. 2005. Uso de la vegetación nativa de Barranquilla, según índice de confort. Grupo de Estudios de Arquitectura Bioclimática GEAB. Facultad de Arquitectura. Universidad del Atlántico, Colombia.
- GROSS G. 1987. A numerical study of the air flow within and around a single tree. *Journal Boundary-Layer Meteorology*. Publisher Springer Netherlands. Volume 40, Number 4 / September, 1987. pp 311-327. 2004.
- HICKS, B. B., HYSON, P, MOORE, C. J. 1975. A study of Eddy Fluxes over a forest. *Journal Applied Meteorology*, vol. 14, pp. 58-66.
- HOTCHKISS, R.S. and F.H. HARLOW. 1973. Air pollution transport in street canyons. Report by Los Alamos Scientific Laboratory for US Environmental Protection Agency, EPA-R4-73-029, NTIS PB-233 252.
- KARLIK, Jhon F et MCKAY, Alistar H. 2002. Leaf Area Index, Leaf Mass Density, and Allometric Relationships derived from Harvest of Blue Oaks in California Oak Savanna. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-184.
- LEHTIHET, K., IZARD, J. L., MARCILLAT, J., DESTOBBELEIRE, G. 2002. Evaluation of microclimatic effects on urban sites by means of insitu measurements, thermographic study and numerical simulation. In: *Proc. of First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment*, Nantes, France, p. 12.
- LESAUX, Delphine. 2003. Le projet de la place Ludovise à Bordeaux en 1784 : Analyse

des écoulements dus aux vents dans les rues rayonnantes au regard des théories du Siècle des Lumières. Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. 149 p.

MESTAYER, P. G., ANQUETIN, S. 1994. Climatology of cities. In: Gyr, A., Rys, F. S. (Eds.), *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*: Kluwer Academic Publishers, pp. 165 -189.

NICHOLSON, S., 1975. A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* Vol.9. p.p. 19-311 1975.

OKE, T. R. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, vol. 11, pp. 103-113. OKE, R. 1987. *Boundary layer climates*. 2th ed. Londres: Routledge, 435 p.

PANÃO, Marta Oliveira, GONÇALVES, Helder and FERRÃO, Paulo. 2006. Air Flow Exchange Velocity of Urban Canyon Cavities due to Thermal Spatial Differences. Renewable Energy Department, INETI, Lisbon, Portugal. IN+, Center for Innovation, Tech. and Policy Research, IST, Lisbon, Portugal. PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.

POT, 2002. Plan de Ordenamiento Territorial de Barranquilla.

RAUNER, J.L. 1976. Deciduous forest. In: *Vegetation and the Atmosphere*. (Monteith J.L., ed.), Academic Press, London, pp. 241-264.

RAYMOND, Franck. 1999. Modélisation des effets de la végétation par porosité et pertes de charge dans N3S. CERMA UMR CNRS 1563. 23 p.

ROBITU, Mirela. 2005. Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain: influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. Nantes 2005. 249 p.

VINET, Jérôme. 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. Nantes, 2000. 245 p.

WARWICK DISTRICT COUNCIL. 2003. *The Benefits of Urban Trees*

Sitios web consultados:

CENTRE DE RECHERCHE ET D'EXPERIMENTATIONS DES ARTS FORESTIERS (CREAF). Disponible en: <http://territoire.org/FRANCAIS/CREAF/foretcreative/glos->

sairetermesforestiers.html. Consultado el 02/05 2007.
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (CEA). Simulations numériques journalières de la biosphère terrestre. Disponible en: <http://www-lsceorchidee.cea.fr/>
DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE COLOMBIA (DANE). Disponible en: <http://www.dane.gov.co/>
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA (IDEAM). Disponible sur: <http://www.ideam.gov.co/>
JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ DE LORENZO-CÁCERES. Árboles Ornamentales. Disponible en: <http://www.arbolesornamentales.com/>